

(19)



(11)

EP 1 880 971 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
21.09.2016 Patentblatt 2016/38

(51) Int Cl.:
B66C 13/08 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **07007445.5**

(22) Anmeldetag: **11.04.2007**

(54) Verfahren zum Steuern der Orientierung einer Kranlast

Method for controlling the orientation of a crane load

Procédé de commande de l'orientation d'une charge de grue

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MT NL PL PT RO SE SI SK TR

- **Sawodny, Oliver, Prof. Dr.-Ing. 70186 Stuttgart (DE)**
- **Schneider, Klaus, Dr. Dipl.-Ing. 88145 Hergatz (DE)**

(30) Priorität: **18.07.2006 DE 102006033277**

(74) Vertreter: **Lauffhütte, Dieter et al Lorenz Seidler Gossel Rechtsanwälte Patentanwälte Partnerschaft mbB Widenmayerstraße 23 80538 München (DE)**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
23.01.2008 Patentblatt 2008/04

(73) Patentinhaber: **Liebherr-Werk Nenzing GmbH 6710 Nenzing (AT)**

(56) Entgegenhaltungen:
DE-A1- 10 029 579 DE-A1- 10 064 182
DE-A1- 19 826 695 DE-A1- 19 907 989

(72) Erfinder:
• **Neupert, Jörg 70825 Korntal-Münchingen (DE)**

EP 1 880 971 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Steuern der Orientierung einer Kranlast, wobei ein Manipulator zum Handhaben der Last durch eine Rotatoreinrichtung mit einem an Seilen hängenden Haken verbunden ist und der Drehwinkel φ_L der Last durch eine Steuereinrichtung unter Verwendung des Trägheitsmoments J_L der Last als wichtigster Parameter gesteuert wird.

[0002] In DE 100 64 182 und DE 103 24 692, deren gesamter Inhalt durch Erwähnung in die vorliegende Anmeldung aufgenommen wird, werden Steuer- und Automatisierungskonzepte für Hafeneinrichtungen offenbart. Bei diesen Drehhaulerkranen hängt der Manipulator zum Aufnehmen der Last an Seilen, und ein Positionieren des Manipulators zum Aufnehmen von Containern verursacht Kugelpendelbewegungen. Die Steuerkonzepte verwenden eine Bahnnachverfolgungssteuerung zum Steuern der Bewegung der Last und zum automatischen Vermeiden von Pendeln, wodurch die Effektivität des Frachtgutumschlagprozesses verbessert wird.

[0003] Für solche Steuersysteme ist ein Verfahren zum Steuern der Orientierung der Kranlast aus DE 100 29 579 bekannt, deren gesamter Inhalt durch Erwähnung in die vorliegende Erfindung aufgenommen wird. Dort weist der an Seilen hängende Haken eine einen Hydraulikantrieb enthaltende Rotatoreinrichtung auf, so dass der Manipulator zum Aufnehmen von Containern um eine vertikale Achse gedreht werden kann. Dadurch ist es möglich, die Orientierung der Kranlasten zu verändern. Wenn der Kranführer bzw. die automatische Steuerung ein Signal zum Drehen des Manipulators und dadurch der Last um die vertikale Achse gibt, werden die Hydraulikmotoren der Rotatoreinrichtung betätigt, und ein resultierender Durchfluss verursacht ein Drehmoment. Wenn der Haken an Seilen hängt, würde das Drehmoment zu einer Torsionsschwingung des Manipulators und der Last führen. Zum Positionieren der Last bei einem spezifischen Winkel φ_L muss diese Torsionsschwingung kompensiert werden.

[0004] Das bekannte Steuerverfahren nutzt ein dynamisches Modell des Systems basierend auf den Bewegungsgleichungen eines physikalischen Modells des Krans, wobei die bekannte Antitorsionsschwingungssteuerung aus einem Bahnplanungsmodul und einem Bahnnachverfolgungsmodul besteht. Das Bahnplanungsmodul berechnet die Bahn der Variablen, die den Zustand des Systems beschreiben, und erzeugt eine Referenzfunktion. Die Bahnnachverfolgungssteuerung kann in Störunterdrückung, Regelung mit Hilfsstellgröße (so genannte Feed Forward Control) und Regelung mit Zustandsrückführung (so genannte State Feed back Control) unterteilt werden. Die von der Regeleinrichtung verwendeten Parameter sind die Masse der Last und vor allem das Trägheitsmoment der Last.

[0005] Die Massenverteilung in der Last, z.B. einem Container, ist aber nicht bekannt, und daher ist das Trägheitsmoment der Last ebenfalls nicht bekannt. Daher muss das Trägheitsmoment J_L der Last geschätzt werden. Bei dem bekannten Steuersystem erfolgt dies durch Annehmen einer homogenen Massenverteilung in der Last und Berechnen eines geschätzten Trägheitsmoments J_L der Last allein aus der Masse des Containers und den bekannten Maßen des Containers.

[0006] Die Lastverteilung in einem Container ist aber meist alles andere als homogen, so dass der geschätzte Wert der Last J_L nur eine sehr ungenaue Annäherung ist. Da die Steuereinrichtung das Trägheitsmoment J_L der Last als Parameter zum Steuern der Orientierung der Kranlast verwendet, führt die Differenz zwischen dem wahren Wert des Trägheitsmoments J_L und der groben Schätzung zu einer Ungenauigkeit bei der Steuerung der Orientierung der Last.

[0007] Aus der DE 199 07 989 A1 ist ein Verfahren zur Bahnregelung von Kranen sowie eine Vorrichtung zum bahngenaue Verfahren einer Last bekannt. Für die Bahnregelung wird ebenfalls das Trägheitsmoment der Last herangezogen.

[0008] Das Ziel der vorliegenden Erfindung besteht daher darin, ein Verfahren zum Steuern der Orientierung der Kranlast an die Hand zu geben, das eine bessere Genauigkeit aufweist.

[0009] Dieses Ziel wird durch ein Verfahren zum Steuerung der Orientierung einer Kranlast nach Anspruch 1 verwirklicht, wobei die Steuereinrichtung zum Steuern des Drehwinkels φ_L der Last eine adaptive Steuereinrichtung ist, wobei das Trägheitsmoment J_L der Last während des Kranbetriebs anhand von Daten ermittelt wird, die durch Messen des Systemzustands erhalten werden.

[0010] Dadurch kann das Trägheitsmoment J_L der Last ermittelt werden, was zu einer besseren Genauigkeit bei diesem wichtigen Parameter führt, der von der Steuereinrichtung zum Steuern der Orientierung der Kranlast genutzt wird. Die Steuereinrichtung wird während des Kranbetriebs durch Verwenden eines korrigierten Werts des Trägheitsmoments J_L , der während des Kranbetriebs anhand der durch Messen des Systemzustands erhaltenen Daten bestimmt wird, als Parameter angepasst. Daher verwendet die Steuereinrichtung keinen einmalig geschätzten Festwert, sondern einen Wert, der mit Hilfe weiterer während des Kranbetriebs gewonnener Informationen angepasst wird.

[0011] Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zum Steuern der Drehung des Krans wird der Drehwinkel φ_L der Last vorteilhafterweise mit Hilfe einer adaptiven Bahnnachverfolgungssteuerung gesteuert. Dies erlaubt eine wirksame Steuerung der Bewegungen der Kranlast. Zum Beispiel kann eine Regelung mit Hilfsstellgröße zum Berechnen der Bahnen der Systemvariablen anhand von Vorwärtsintegration der Bewegungsgleichungen des Systems verwendet werden, und eine Regelung mit Zustandsrückführung kann durch Messen des Systemzustands erhaltene Daten verwenden.

[0012] Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zum Steuern der Drehung einer Kranlast wird vorteilhafterweise ein

dynamisches Modell des Systems zum Berechnen von Daten verwendet, die den Systemzustand beschreiben, d.h. der Bahnen der Systemvariablen. Diese Daten können dann die Grundlage zum Steuern der Drehung der Kranlast bilden, wobei das dynamische Modell des Systems eine genaue Beschreibung des Systems und daher eine präzise Steuerung der Orientierung der Kranlast erlaubt.

5 **[0013]** Bei einer Weiterentwicklung des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Steuern der Orientierung einer Kranlast kann die Differenz φ_C zwischen dem Drehwinkel φ_L der Last und dem Drehwinkel φ_H des Hakens durch die Rotatoreinrichtung verändert werden. Dies erfolgt vorteilhafterweise durch Verwenden eines Hydraulikmotors für die Rotatoreinrichtung, so dass durch die Rotatoreinrichtung Drehmoment angelegt werden kann. Das ermöglicht ein Drehen des Manipulators und dadurch der Last um eine vertikale Achse, wodurch eine Orientierung der Last in jeder erwünschten

10 Richtung ermöglicht wird.
[0014] Bei einer Weiterentwicklung des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Steuern der Orientierung einer Kranlast werden Torsionsschwingungen durch eine Antitortionsschwingungseinrichtung unter Verwendung der von dem dynamischen Modell errechneten Daten vermieden. Diese Antitortionsschwingungseinrichtung nutzt die von dem dynamischen Modell errechneten Daten, um die Rotatoreinrichtung so zu steuern, dass Schwingungen der Last vermieden werden. Dadurch kann die Antitortionsschwingungseinrichtung Steuersignale erzeugen, die von dem dynamischen Modell vorhergesagten möglichen Schwingungen der Last entgegenwirken. Wird ein Hydraulikmotor für den Rotator verwendet, kann die Antitortionsschwingungseinrichtung Signale zum Betätigen des Hydraulikmotors erzeugen, wodurch ein durch den resultierenden Durchfluss erzeugtes Drehmoment angelegt wird.

15 **[0015]** Bei einer Weiterentwicklung des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Steuern der Orientierung einer Kranlast wird die Differenz φ_C zwischen dem Drehwinkel φ_L der Last und dem Drehwinkel φ_H des Hakens durch einen mit der Rotatoreinrichtung verbundenen Messwertgeber gemessen. Dieser Messwertgeber ermöglicht das exakte Messen der Differenz φ_C und trägt dadurch dazu bei, die Orientierung der Last zu steuern.

20 **[0016]** Bei einer Weiterentwicklung des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Steuern der Orientierung einer Kranlast werden die Bewegungen eines durch das Seil geführten kardanischen Elements gemessen, um Daten zu erhalten, durch welche der Drehwinkel φ_H des Hakens und/oder der Drehwinkel φ_L der Last ermittelt werden können. Das kardanische Element ist bevorzugt durch eine kardanische Verbindung mit dem Auslegerkopf des Krans verbunden und folgt den Bewegungen des Seils, an dem es durch Rollen geführt ist. Durch Messen der Bewegungen des kardanischen Elements können die Bewegungen des Seils ermittelt werden. Da der Haken meist an mehreren Seilen hängt, werden bevorzugt mindestens zwei kardanische Elemente vorgesehen, um die Bewegungen von mindestens zwei dieser Seile zu ermitteln. Der Drehwinkel φ_H des an den Seilen hängenden Haken und/oder der Drehwinkel φ_L der Last können dann aus den durch Messen der Bewegungen der kardanischen Elemente erhaltenen Daten ermittelt werden.

25 **[0017]** Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zum Steuern der Orientierung einer Kranlast wird ein Gyroskop verwendet, um Daten zu erhalten, durch welche der Drehwinkel φ_H des Hakens und/oder der Drehwinkel φ_L der Last ermittelt werden können. Die Verwendung eines Gyroskops ist eine besonders effektive Möglichkeit, diese Daten mit ausreichender Präzision zu erhalten. Das Gyroskop kann an verschiedenen Stellen am Kran angebracht werden. Wenn kardanische Elemente verwendet werden, kann das Gyroskop an den kardanischen Elementen angebracht werden, um deren Bewegungen zu messen, es ist aber auch möglich, das Gyroskop direkt am Haken oder am Manipulator anzubringen.

30 **[0018]** Bei einer Weiterentwicklung des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Steuern der Orientierung einer Kranlast wird die Änderung $\dot{\varphi}_H$ des Drehwinkels φ_H des Hakens und/oder die Änderung $\dot{\varphi}_L$ des Drehwinkels φ_L der Last durch ein Gyroskop gemessen. Das Gyroskop kann entweder am Haken oder am Manipulator angebracht werden, bevorzugt aber am Haken. Gyroskope können die Winkelgeschwindigkeiten $\dot{\varphi}_H$ und $\dot{\varphi}_L$ messen, was eine Ermittlung des Drehwinkels φ_H des Hakens und von φ_L ermöglicht. Wenn $\dot{\varphi}_H$ von dem Gyroskop gemessen wird, kann φ_H durch Integration ermittelt werden. Der Drehwinkel φ_L der Last kann dann durch Verwenden der Differenz φ_C zwischen dem Drehwinkel φ_L der Last und dem vom Messwertgeber gemessenen Drehwinkel φ_H des Hakens berechnet werden. Da der von dem Gyroskop gemessene Wert von $\dot{\varphi}_H$ Rauschen und ein Offset enthält, würde eine direkte Integration zu einer Summierung dieser Fehler führen, was zu schlechten Ergebnissen bei der Genauigkeit führen würde. Daher wird vorteilhafterweise ein Störbeobachter zum Ausgleichen des Offset verwendet. Dies erlaubt eine stabilere Schätzung des Drehwinkels φ_L aus der Winkelgeschwindigkeit $\dot{\varphi}_H$.

35 **[0019]** Bei einer Weiterentwicklung des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Steuern der Orientierung einer Kranlast beruht das dynamische Modell des Systems auf den Bewegungsgleichungen eines physikalischen Modells mindestens der Seile, des Hakens und der Last. Bei einem solchen physikalischen Modell bilden der Haken und die Last, die an den Seilen hängen, ein Torsionspendel, dessen Bewegungsgleichungen mit Hilfe z.B. des Lagrange-Formalismus ermittelt werden können. Dies ermöglicht eine realistische Beschreibung des Systems und daher eine präzise Bahnplanung und -steuerung.

40 **[0020]** Vorteilhafterweise werden das Trägheitsmoment J_H des Hakens und J_{Sp} des Manipulators als Parameter für die Steuerung des Drehwinkels φ_L der Last verwendet. Auch wenn das Trägheitsmoment J_H des Hakens und J_{Sp} des Manipulators meist kleiner als das Trägheitselement J_L der Last sind, tragen sie dennoch zum Drehverhalten des Systems

bei und sollten bei den Berechnungen und dem physikalischen Modell berücksichtigt werden.

[0021] Bei einer Weiterentwicklung des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Steuern der Orientierung einer Kranlast wird während des Betriebs des Krans an der Last und/oder dem Haken ein Drehmoment angelegt. Die durch Messen des Systemzustands während des Anlegens eines Drehmoments am Haken und/oder der Last erhaltenen Daten erlauben

die Schätzung des Trägheitsmoments J_L der Last, z.B. durch Verwenden eines Beobachters.

[0022] Vorteilhafterweise umfassen die durch Messen des Systemzustands erhaltenen Daten mindestens die Änderung $\dot{\varphi}_H$ des Drehwinkels φ_H des Hakens und/oder die Änderung $\dot{\varphi}_L$ des Drehwinkels φ_L der Last als Reaktion auf das an der Last und/oder dem Haken angelegte Drehmoment. Diese Daten können dann zum Schätzen des Trägheitsmoments J_L der Last verwendet werden, z.B. durch Vergleichen der von dem dynamischen Modell errechneten Daten mit den gemessenen Daten.

[0023] Bei einer Weiterentwicklung des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Steuern der Orientierung einer Kranlast wird ein Wert des Trägheitsmoments J_{L0} , der auf der Grundlage der Masse und der Maße der Last allein geschätzt wird, als Ausgangswert für J_L verwendet, und korrigierte Werte J_{Lk} werden in einem iterativen Prozess ermittelt, um das Trägheitsmoment J_L zu bestimmen. Dies ergibt anhand der Daten, die schnell verfügbar sind, eine grobe Schätzung des Ausgangswerts für J_L während bessere Schätzungen während des Kranbetriebs anhand der weiteren Daten ermittelt werden, die durch Messen des Systemzustands erhalten werden.

[0024] Bei einer Weiterentwicklung des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Steuern der Orientierung einer Kranlast werden während des Kranbetriebs den Systemzustand beschreibende Daten von dem dynamischen Modell basierend auf einem Wert $J_{L,k-1}$ des Trägheitsmoments J_L errechnet, und ein korrigierter Wert J_{Lk} des Trägheitsmoments J_L wird anhand der errechneten Daten und der durch Messen des Systemzustands erhaltenen Daten ermittelt, um das Trägheitsmoment J_L zu bestimmen. Dies erlaubt eine weitaus bessere Schätzung des Trägheitsmoments J_L als die Verwendung der Masse und der Maße der Last allein.

[0025] Das Trägheitsmoment J_L wird erfindungsgemäß mit Hilfe eines Beobachters bestimmt. Dieses Verfahren zur Schätzung des Trägheitsmoments J_L nutzt durch das dynamische Modell errechnete Daten und kombiniert diese mit Daten, die durch Messen des Systemzustands erhalten wurden, um den Parameter J_L des dynamischen Modells zu schätzen. Das Verwenden eines Beobachters zum Ermitteln von Variablen des Systems wie zum Beispiel des Drehwinkels φ_H des Hakens aus der von dem Gyroskop gemessenen Winkelgeschwindigkeit $\dot{\varphi}_H$ war bereits bekannt. Hier wird aber ein Parameter des Modells mit Hilfe eines Beobachters ermittelt, was zu einer adaptiven Steuerung führt.

[0026] Wenn ein Parameter des Modells von dem Beobachter geschätzt wird, wird das Problem nichtlinear, so dass das Trägheitsmoment J_L vorteilhafterweise mit Hilfe eines nichtlinearen Beobachters bestimmt wird. Es gibt verschiedene Möglichkeiten zum Implementieren eines nichtlinearen Beobachters, insbesondere bei zeitvarianten Modellen, zum Beispiel einen High-Gain-Ansatz oder das erweiterte Kalman-Filter.

[0027] Die letzte Möglichkeit bietet ein sehr stabiles System zum schnellen Schätzen von Parametern des Systems, so dass das Trägheitsmoment J_L vorteilhafterweise mit Hilfe eines erweiterten Kalman-Filters bestimmt werden kann.

[0028] Bei einer Weiterentwicklung des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Steuern der Orientierung einer Kranlast wird für die Schätzung eines Ausgangswerts J_{L0} des Trägheitsmoments J_L der Last eine homogene Verteilung von Masse in der Last angenommen. Dies erlaubt eine schnelle Berechnung, die nur die Masse und die Maße der Last als Eingabe benötigt.

[0029] Bei einer Weiterentwicklung des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Steuern der Orientierung einer Kranlast wird Rauschen in den durch Messungen erhaltenen Daten bei der Bestimmung des Trägheitsmoments J_L berücksichtigt. Dies führt zu mehr Präzision bei der Schätzung des Trägheitsmoments J_L , die auf den gemessenen Daten beruht und daher durch Rauschen in den Messungen beeinflusst wird.

[0030] Vorteilhafterweise wird das Rauschen in den durch Messungen erhaltenen Daten durch Kovarianzmatrizen modelliert. Dies erlaubt eine quantitative Beschreibung des Einflusses des Rauschens und kann die sich aus dem Rauschen ergebenden Fehler minimieren.

[0031] Diese Kovarianzmatrizen werden vorteilhafterweise experimentell ermittelt. Durch Testen des Steuersystems mit verschiedenen Werten für die Kovarianzmatrizen können die besten Werte für eine schnelle und stabile Schätzung des Trägheitsmoments J_L ermittelt und für den Beobachter verwendet werden.

[0032] Die vorliegende Erfindung umfasst weiterhin ein System zum Steuern der Orientierung einer Kranlast mit Hilfe eines der oben beschriebenen Verfahren. Ein solches Steuersystem umfasst eine Steuereinrichtung zum Steuern des Drehwinkels φ_L der Last. Die Steuereinrichtung enthält eine Bahnplanungseinrichtung und eine Bahnsteuerungseinrichtung sowie einen Beobachter zum Schätzen des Trägheitsmoments J_L .

[0033] Die vorliegende Erfindung umfasst weiterhin einen Kran, insbesondere einen Auslegerkran, der ein System zum Steuern der Drehung einer Kranlast mit Hilfe eines der vorstehend beschriebenen Verfahren umfasst. Ein solcher Kran umfasst einen an Seilen hängenden Haken, eine Rotatoreinrichtung und einen Manipulator. Vorteilhafterweise umfasst der Kran auch ein Anti-Pendel-Steuersystem, das mit dem System zum Steuern der Drehung eines Krans zusammenwirkt. Wenn der Kran ein Auslegerkran ist, umfasst er einen Ausleger, der um eine horizontale Achse auf und ab geschwenkt und durch einen Turm um eine vertikale Achse gedreht werden kann. Ferner kann die Länge des

Seils verändert werden.

[0034] Nun wird die vorliegende Erfindung anhand der folgenden Zeichnungen näher beschrieben. Darin zeigen

Fig. 1a eine Seitenansicht und eine Draufsicht eines Hafenmobilkrans,

Fig. 1b eine Seitenansicht eines Auslegerkopfes des Hafenmobilkrans mit einem kardanischen Element,

Fig. 2 den Steueraufbau des Hafenmobilkrans,

Fig. 3 den Aufbau der Antitorsionsschwingungssteuerung,

Fig. 4 eine an einem Seil hängende Rotatoreinrichtung mit Manipulator und Last,

Fig. 5 den Aufbau eines Simulationsumfelds,

Fig. 6 die Ermittlungsleistung des erweiterten Kalman-Filters abhängig von der Wahrscheinlichkeitsmatrix P_0 ,

Fig. 7 die Bestimmung von J_L mit falschem Ausgangswert,

Fig. 8 die Bestimmung von J_L mit richtigem Ausgangswert.

[0035] Auslegerkrane werden häufig zum Abwickeln von Frachturnschlagvorgängen in Häfen eingesetzt. Ein solcher Hafenmobilkran wird in Fig. 1 a gezeigt. Der Kran weist eine Lastkapazität von bis zu 140 t und eine Seillänge von bis zu 80 m auf. Er umfasst einen Ausleger 1, der um eine horizontale Achse auf und ab geschwenkt werden kann, die durch die Gelenkachse 2 gebildet wird, mit der er an einem Turm 3 angebracht ist. Der Turm 3 kann um eine vertikale Achse gedreht werden, wodurch auch der Ausleger 3 mit diesem gedreht wird. Der Turm 3 ist an einem an Rädern 7 angebrachten Unterwagen 6 befestigt. Die Länge des Seils 8 kann durch Winden verändert werden. Die Last 10 kann von einem Manipulator oder Spreader 20 aufgenommen werden, der durch eine Rotatoreinrichtung 15 gedreht werden kann, die in einem an dem Seil 8 hängenden Haken angebracht ist. Die Last 10 wird entweder durch Drehen des Turms und dadurch des ganzen Krans oder durch Verwenden der Rotatoreinrichtung 15 gedreht. In der Praxis müssen beide Drehungen gleichzeitig genutzt werden, um die Last in einer erwünschten Position auszurichten.

[0036] Der Einfachheit halber wird hier nur die Drehung einer Last, die an einem ansonsten unbeweglichen Kran hängt, erläutert. Das erfindungsgemäße Steuerkonzept kann aber problemlos in ein Steuerkonzept für den gesamten Kran integriert werden.

[0037] Insbesondere für Containerumschlag wurde die aus DE 100 64 182 und DE 103 24 692 bereits bekannte Antipendelsteuerung um ein Steuer- und Automatisierungskonzept für die Containerorientierung basierend auf dem dynamischen Modell des Systems erweitert, um eine unerwünschte Schwingung der Last zu verhindern. Dieses Steuerkonzept für die Containerorientierung wird in DE 100 29 579 offenbart, wo das Trägheitsmoment der Kranlast basierend auf der Annahme geschätzt wird, dass die Massenverteilung im Container homogen ist.

[0038] Da das Spreader/Rotator-System als Roboter mit flexiblem Arm mit einem langsamen dynamischen Verhalten betrachtet werden kann, wird ein adaptives und modellbasiertes Verfahren zur Steuerung des Manipulators eingesetzt. Um die Leistung dieses Steuerkonzepts zu verbessern, müssen die Parameter des dynamischen Modells des Systems und insbesondere das Trägheitsmoment der Last so genau wie möglich bekannt sein. Die vorliegende Erfindung offenbart ein Bestimmungsverfahren zum Verbessern dieser Steuer- und Automatisierungskonzepte eines Hafenmobilkrans, die in DE 10064182, DE 10324692 und DE 10029579 sowie in O. Sawodny, H. Aschemann, J. Kümpel, C. Tarin, K. Schneider, Anti-Sway Control for Boom Cares, American Control Conference, Anchorage USA, Proc. Seiten 244-249, 2002; O. Sawodny, A. Hildebrandt, K. Schneider, Control Design for the Rotation of Crane Loads for Boom Cranes, International Conference on Robotics & Automation, Taipei Taiwan, Proc. Seiten 2182-2187, 2003 und J. Neupert, A. Hildebrandt, O. Sawodny, K. Schneider, A Trajectory Planning Strategy for Large Serving Robots, SICE Annual Conference, Okayama Japan, Proc. Seiten 2180-2185, 2005, beschrieben werden.

[0039] Aufgrund der ungewöhnlich inhomogenen Verteilung der Last in dem Container ist das anhand der Annahme, dass die Verteilung von Last homogen ist, geschätzte Trägheitsmoment nur eine sehr grobe Annäherung an diesen Parameter, was zu einer ungenauen Steuerung der Orientierung des Containers führt. Daher offenbart die vorliegende Erfindung ein Verfahren zum Bestimmen des Trägheitsmoments der Last während des Kranbetriebs beruhend auf durch Messen des Systems erhaltenen Daten. Diese Art des Schätzens des Trägheitsmoments der Last mit Hilfe eines Beobachteransatzes führt zu einer besseren Genauigkeit des Steuerverfahrens.

[0040] Die Daten, auf denen die Ermittlung des Trägheitsmoments der Last beruht, können durch verschiedene Verfahren erhalten werden. Fig. 1b zeigt ein kardanisches Element 35, das an dem Auslegerkopf 30 eines Auslegers 1

durch kardanische Verbindungen 32 und 33 unter der Hauptrolle 31 angebracht ist. Das kardanische Element 35 weist Rollen 36 auf, durch die es an dem Seil 8 geführt wird, so dass es den Bewegungen des Seils 8 folgt. Die kardanischen Verbindungen 32 und 33 erlauben dem kardanischen Element 35, sich frei um eine horizontale und eine vertikale Achse zu bewegen, unterbinden aber Drehbewegungen. Die Bewegungen des kardanischen Elements und somit die Bewegungen des Seils können gemessen werden. In dieser Ausführung werden zwei kardanische Elemente 35 vorgesehen, die an den zwei Seilen geführt sind, an denen der Haken hängt. Diese Daten können dann zum Berechnen der Torsion der Seile und des Winkels φ_H der Torsion des Hakens verwendet werden. Für diesen Zweck kann ein Gyroskop an den kardanischen Elementen angebracht werden. Werden keine kardanischen Elemente verwendet, kann ein Gyroskop auch direkt an dem Haken oder dem Manipulator angebracht werden, um deren Drehwinkel zu ermitteln.

[0041] In der vorliegenden Erfindung können verschiedene Beobachterverfahren zum Bestimmen des Trägheitsmoments der Last während des Kranbetriebs anhand von durch Messen des Systems erhaltenen Daten verwendet werden.

[0042] Durch Anwenden der Methode der kleinsten Quadrate bei den gemessenen Eingabe-/Ausgabedaten können Systemparameter geschätzt werden. Die Standardmethode der kleinsten Quadrate ist aber beim Schätzen von sich zeitlich ändernden Parametern unbefriedigend. Zur Lösung dieses Problems kann ein exponentielles Vergessen der älteren Daten verwendet werden. Der so genannte Forgetting Faktor kann so gewählt werden, dass die resultierende Gain-Matrix eine konstante Spur hält. Dieser Ansatz kann weiter zu dem Gain-angepassten Verfahren des Vergessens entwickelt werden, bei dem der Forgetting-Faktor entsprechend der Norm der Gain-Matrix ständig verändert wird.

[0043] Ein anderes Verfahren zur Bestimmung der Parameter von dynamischen Systemen ist das erweiterte Kalman-Filter, das in der erfindungsgemäßen Ausführung verwendet wird. Bei der Verwendung dieses Verfahrens gibt es mehrere Vorteile, auf die später eingegangen wird.

[0044] Fig. 2 zeigt ein bekanntes adaptives Steuerkonzept zum Handhaben der Orientierung der Last (des Containers). Dieses in (O. Sawodny, A. Hildebrandt, K. Schneider, Control Design for the Rotation of Crane Loads for Boom Cranes, International Conference on Robotics & Automation, Taipei Taiwan, Proc. Seiten 2182-2187, 2003) vorgestellte und auch in DE 10029579 offenbarte Steuerkonzept, deren Inhalt durch Erwähnung in diese Anmeldung aufgenommen wird, besteht aus einer Bahnnachverfolgungssteuerung, einem Störbeobachter und einer Regelung mit Zustandsrückführung, um Torsionsschwingungen zu unterbinden. Zur Steuerung der Lastorientierung wird der Torsionswinkel aus der Winkelgeschwindigkeit rekonstruiert, die durch ein Gyroskop im Haken gemessen wird. Der Winkel zwischen dem Haken und dem Container wird durch einen Messwertgeber gemessen. Die Lastorientierung wird durch Summieren beider Winkel erhalten. Aufgrund der Tatsache, dass alle Teile des Steuerkonzepts modellbasierte Algorithmen sind, müssen sie an Parameteränderungen angepasst werden. Die meisten Parameter können direkt gemessen werden, doch ist die Verteilung der Lastmasse im Container und somit das Trägheitsmoment des Containers unbekannt.

[0045] Da dieser Parameter einen großen Einfluss auf das dynamische Verhalten des Torsionsoszillators und somit auf die Leistung der Antischwingungssteuerung hat, muss er on-line bestimmt werden.

Dynamisches Modell für den am Seil hängenden Manipulator

[0046] Zum Umschlagen der Container ist der Auslegerkran mit einem speziellen Manipulator, dem so genannten Spreader, ausgerüstet. Der Manipulator kann durch eine einen Hydraulikantrieb enthaltende Rotatoreinrichtung um die vertikale Achse gedreht werden. Wie in Figur 4 gezeigt wird, ist diese Einrichtung im Haken installiert.

[0047] Der Haken ist an zwei Seilen befestigt, wobei r und l_s den effektive Abstand der beiden parallelen Seile bzw. die Seillänge angeben. Das System besteht aus drei erweiterten Körpern. Der Last (Container), gekennzeichnet durch das Trägheitsmoment J_L , und der Masse m_L , dem Manipulator (Container-Spreader) und dem Haken. J_{Sp} und J_H geben das Trägheitsmoment des Spreader und des Hakens an, m_{Sp} und m_H geben jeweils die Masse der beiden Körper an. Der Drehwinkel des Spreader mit Last wird als φ_L bezeichnet. Der zweite Winkel φ_H gibt den Torsionswinkel an.

[0048] Zum Ableiten der Bewegungsgleichungen des betrachteten mechanischen Systems wird die Lagrange-Formulierung verwendet (nach L. Sciavicco, B. Siciliano, Modelling and Control of Robot Manipulators, Springer-Verlag London, Großbritannien, 2001).

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \xi_i \quad (1)$$

[0049] Die Lagrange-Funktion L ist als Differenz zwischen der kinetischen Energie T und der potentiellen Energie U des Systems definiert.

$$L = T - U \quad (2)$$

[0050] Unter der Annahme, dass Haken, Spreader und Last (Container) zu einem erweiterten Körper mit dem Gesamtträgheitsmoment $J_{total} = J_H + J_{Sp} + J_L$ zusammengefasst werden, werden die kinetische und potentielle Energie wie folgt erhalten:

5

$$T = \frac{J_{total}}{2} \dot{\varphi}_H^2; \quad U = \frac{c_l}{2} \varphi_H^2 \quad (3)$$

10 [0051] c_l beschreibt die linearisierte Torsionssteifigkeit der beiden parallelen Seile als Funktion der Parameter $M_{total} = m_H + m_{Sp} + m_L$ und l_s , (g ist die Gravitationskonstante):

15

$$c_l = \frac{m_{total} g r^2}{4 l_s} \quad (4)$$

[0052] Das Lösen der Gleichung (1) mit der resultierenden Lagrange-Funktion und der generalisierten Koordinate $q = \varphi_H$ führt zu dem dynamischen Modell der Rotatoreinrichtung mit Last.

20

$$J_{total} \ddot{\varphi}_H + c_l \varphi_H = \xi \quad (5)$$

[0053] Die generalisierte Kraft ist das Moment des Hydraulikmotors und kann definiert werden als

25

$$\xi = -(J_{sp} + J_l) \ddot{\varphi}_c \quad (6)$$

30 wobei $\ddot{\varphi}_c$ die relative Winkelbeschleunigung zwischen dem Haken und dem Spreader ist

$$(\ddot{\varphi}_c = \ddot{\varphi}_l - \ddot{\varphi}_H).$$

35

[0054] Für das Bestimmungsverfahren wird das stetige Modell (Gleichungen (5) und (6)) in ein Raummodell diskreten Zustands mit folgender Form umgewandelt:

40

$$\begin{aligned} \underline{x}_{k+1} &= \underline{\Phi} \underline{x}_k + \underline{H} u_k \\ \underline{y}_k &= \underline{C} \underline{x}_k \end{aligned} \quad (7)$$

45 [0055] Die Systemmatrizen, der Zustandsvektor und der Eingabevektor werden erhalten:

50

55

$$\begin{aligned}
 \underline{\Phi}(T) &= \begin{bmatrix} \cos(aT) & \frac{1}{a} \sin(aT) \\ -a \sin(aT) & \cos(aT) \end{bmatrix} \\
 \underline{H}(T) &= \begin{bmatrix} \frac{J_{sp} + J_l}{c_l} [\cos(aT) - 1] \\ -\frac{J_{sp} + J_l}{a J_{total}} \sin(aT) \end{bmatrix} \\
 \underline{C} &= [0 \quad 1] \\
 \underline{x}_k &= [\varphi_{Hk} \quad \dot{\varphi}_{Hk}]^T : u_k = \ddot{\varphi}_{ck}
 \end{aligned} \tag{8}$$

wobei

$$a = \sqrt{\frac{c_l}{J_{total}}}$$

und die Abtastzeit T .

Bestimmung des unsicheren Parameters

[0056] Für den vorgegebenen Anwendungsfall muss das Trägheitsmoment des Containers während des Kranbetriebs ermittelt werden, um das modellbasierte Steuerkonzept anzupassen. Aufgrund dieser Tatsache muss der Bestimmungsalgorithmus für das Trägheitsmoment iterativ sein, so dass jedes Mal, da eine exakte Messung von Eingabe-/Ausgabedaten erhalten wird, eine neue Parameterschätzung erzeugt wird. In der Vergangenheit wurden etliche Systembestimmungsverfahren diskutiert. Eines der Verfahren für die Online-Parameterbestimmung ist das erweiterte Kalman-Filter.

[0057] Zum Schätzen des unbekanntes Trägheitsmoments des Containers wird der Zustandsvektor \underline{x}_k des diskreten Zustandsraummodells (Gleichungen (7) und (8)) um den unbekanntes Parameter J_L erweitert (C.K. Chui, G. Chen, Kalman Filtering with Real-Time Application, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Deutschland, 3. Auflage, 1999).

$$\tilde{\underline{x}}_k = [\varphi_{Hk} \quad \dot{\varphi}_{Hk} \quad J_{Lk}]^T \tag{9}$$

Mit dieser Erweiterung ergibt sich ein nichtlineares diskretes Modell folgender Form:

$$\tilde{\underline{x}}_{k+1} = \underline{f}(\tilde{\underline{x}}_k, u_k) + \underline{g}_k v_k \tag{10}$$

wobei v_k eine Sequenz weißen Gaußschen Rauschens mit null Mittelwert ist, um das reale System präziser zu beschreiben. Das Systemrauschen wird durch die folgende Kovarianzmatrix charakterisiert

$$\underline{Q} = E(v_k v_k^T) \tag{11}$$

Die vektorbewerteten Funktionen f und g werden erhalten durch:

$$\begin{aligned} \underline{f}(\underline{\tilde{x}}_k, \underline{u}_k) &= \begin{bmatrix} \underline{\Phi}(J_{lk})\underline{x}_k + \underline{H}(J_{lk})\underline{u}_k \\ J_{lk} \end{bmatrix} \\ \underline{g}_k &= \begin{bmatrix} \underline{H}(J_{lk}) \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

5
10 **[0060]** Wie in Abschnitt 1 erläutert kann der Drehwinkel des Haken φ_H nicht direkt gemessen werden. Er muss aus der Winkelgeschwindigkeit $\dot{\varphi}_{Hgyro}$ rekonstruiert werden, die durch ein Gyroskop im Haken gemessen wird. Da das Gyroskopsignal gestört ist, muss das Messrauschen berücksichtigt werden, was zu einer Systemausgabe führt, die modelliert werden kann als:

$$15 \quad \underline{y}_k = \underline{h}\underline{\tilde{x}}_k + w_k \quad (13)$$

wobei

$$20 \quad \underline{h} = [0 \quad 1 \quad 0] \quad (14)$$

und w_k ein weißes Gaußsches Rauschen mit null Mittelwert mit der folgenden Kovarianzmatrix ist

$$25 \quad \underline{R} = E(w_k w_k^T) \quad (15)$$

30 **[0061]** Um das Kalman-Filter an dem erhaltenen nichtlinearen System anzulegen, muss es mit Hilfe einer linearen Taylor-Annäherung an die Schätzung des vorherigen Zustands \underline{x}_k linearisiert werden:

$$35 \quad \begin{aligned} \underline{\tilde{x}}_{k+1} \approx & \underline{f}(\underline{\hat{x}}_k, \underline{u}_k) + \underline{F}(\underline{\hat{x}}_k, \underline{u}_k)(\underline{\tilde{x}}_k - \underline{\hat{x}}_k) \\ & + \underline{g}(\underline{\hat{x}}_k) v_k \end{aligned} \quad (16)$$

wobei \underline{F} die Jacobische Matrix von \underline{f} mit den folgenden Koeffizienten ist:

$$40 \quad F_{ij} = \frac{\partial f_i(\underline{\tilde{x}}, \underline{u})}{\partial \tilde{x}_j} \quad (17)$$

45 **[0062]** Durch Berechnen der Koeffizienten für $i, j = 1, \dots, 3$ wird die Jacobische Matrix erhalten als:

$$50 \quad \underline{F} = \begin{bmatrix} \underline{\Phi}(J_{lk}) & \frac{\partial}{\partial J_{lk}}(\underline{\Phi}(J_{lk})\underline{x}_k + \underline{H}(J_{lk})\underline{u}_k) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

55 **[0063]** Mit dem linearisierten Modell und den Kovarianzmatrizen \underline{Q} und \underline{R} kann der optimale Kalman-Filter-Algorithmus in folgender Form abgeleitet werden (T. Iwasaki, T. Kataoka, Application Of An Extended Kalman Filter To Parameter Identification Of An Induction Motor, Industry Applications Society Annual Meeting, Bd. 1, Seiten 248-253, 1989):

1. Schritt: Die Vorhersage der Zustände $[\varphi_{Hk} \dot{\varphi}_{Hk}]$ und des Parameters J_{Lk} wird aus der Eingabe u_k und den geschätzten nicht gestörten Zuständen \underline{x}_k berechnet.

$$\underline{x}_{k+1}^* = \underline{\Phi}(\hat{J}_{Lk}) \hat{x}_k + \underline{H}(\hat{J}_{Lk}) \underline{u}_k \quad (19)$$

2. Schritt: Die Kovarianzmatrizen des Vorhersagefehlers \underline{M}_{k+1} und der Schätzungsfehler \underline{P}_{k+1} sowie die Kalman-Gain-Matrix \underline{K}_{k+1} werden mit Hilfe von Folgendem berechnet (I ist die Identitätsmatrix):

$$\underline{M}_{k+1} = \underline{F}(\hat{x}_k, u_k) \underline{P}_k \underline{F}(\hat{x}_k, u_k)' + \underline{g}(\hat{J}_{Lk}) \underline{Q} \underline{g}(\hat{J}_{Lk})' \quad (20)$$

$$\underline{K}_{k+1} = \underline{M}_{k+1} \underline{C}' (\underline{C} \underline{M}_{k+1} \underline{C}' + \underline{R})^{-1} \quad (21)$$

$$\underline{P}_{k+1} = (\underline{I} - \underline{K}_{k+1} \underline{C}) \underline{M}_{k+1} \quad (22)$$

3. Schritt: Die Schätzung des Zustandsvektors und des Trägheitsmoments des Containers werden durch Korrigieren der vorhergesagten Werte mit der gewichteten Differenz zwischen der gemessenen und der vorhergesagten Winkelgeschwindigkeit des Hakens erhalten.

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_{k+1} \\ \hat{J}_{Lk+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{x}_{k+1}^* \\ \hat{J}_{Lk} \end{bmatrix} + \underline{K}_{k+1} \left(\hat{\varphi}_{Hgyro} - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T \underline{x}_{k+1}^* \right) \quad (23)$$

[0064] Der beschriebene Algorithmus wird jedes Mal, wenn eine neue Messung von Eingabe-/Ausgabedaten verfügbar ist ($k = 1, 2, \dots$), ausgeführt. Zum Initialisieren des erweiterten Kalman-Filters wird in dem Moment, da ein Container aufgenommen wird, ein Startimpuls erzeugt. Die von dem Störbeobachter beobachteten Zustände $[\varphi_H \dot{\varphi}_H]$ sind in diesem Moment die Anfangsschätzung \hat{x}_0 für den Filteralgorithmus. Der Ausgangswert für das Trägheitsmoment des Containers \hat{J}_{L0} kann durch Annehmen, dass der Container eine gleichmäßig verteilte Masse hat, erhalten werden. Da die Länge $l_{\text{container}}$ und die Masse m_L des Containers gemessen werden können und die Breite konstant ist ($b_{\text{container}} = 2,4m$), kann das Trägheitsmoment wie folgt berechnet werden:

$$\hat{J}_{L0} = \frac{m_L}{12} (l_{\text{container}}^2 + b_{\text{container}}^2) \quad (24)$$

[0065] Die Ausgangskovarianzmatrix für den Schätzungsfehler \underline{P}_0 wird zum Abstimmen des Bestimmungsalgorithmus verwendet (siehe Abschnitt 4).

Ergebnisse

Simulation

[0066] Um gute Elemente der Kovarianzmatrix für den Schätzungsfehler \underline{P}_0 zu finden, wird der Bestimmungsalgorithmus in einem simulierten Umfeld implementiert. Wie in Figur 5 gezeigt wird, wird das Simulationsmodell durch das Messsignal $\ddot{\varphi}_{c_measured}$ aus dem realen System beendet. Ferner wird eine Sequenz weißen Rauschens zum Ausgangssignal des Simulationsmodells addiert.

[0067] Die Parameter und die Ausgangsbedingungen der Simulation sind wie folgt:

$$\begin{aligned} \hat{J}_{L0} &= 0.8 \cdot J_{L\text{model}}; J_{L\text{model}} = 36000 \text{kgm}^2 \\ \underline{x}_0 &= [0 \quad 0]^T; \underline{Q} = 10^{-10}; \underline{R} = 10^{-6} \\ T &= 0.025 \text{s}; c_l = 3750; J_H = 940 \text{kgm}^2 \end{aligned} \quad (25)$$

[0068] Die in Figur 6 gezeigten Simulationsergebnisse werden durch Verwenden dieser Konfiguration erhalten. Die drei Kurven stellen die durch Verwenden von drei verschiedenen Ausgangswerten für die Kovarianzmatrix des Schätzungsfehlers erhaltenen Ergebnisse dar. Je höher die Werte dieser Matrix sind, desto schneller erreicht das geschätzte Trägheitsmoment des Containers den Bezugswert $J_{L\text{model}}$.

[0069] Die Ergebnisse zeigen, dass selbst bei Simulation ein oberer Grenzwert für den Ausgangswert der Kovarianzmatrix des Schätzungsfehlers vorliegt, wenn das Simulationsmodell durch das Messsignal $\varphi_{c_measured}$ beendet wird. Dies bedeutet, dass der Bestimmungsalgorithmus stark auf nicht berücksichtigte Störungen der Systemeingabe anspricht, wenn die Ausgangskovarianzmatrix $P_{0ij} = 2 \cdot 10^{10} \delta_{ij}$; $i, j = 1, 2, 3$ (δ_{ij} ist das Kronecker-Delta) oder größer ist.

Experimentelle Untersuchungen

[0070] Um die Leistung des erweiterten Kalman-Filters zu beurteilen, wird der Algorithmus in dem Steuer- und Automatisierungskonzept des Auslegerkrans, insbesondere in dem adaptiven Antitorsionsschwingungssteuerteil, implementiert, wie in Figur 3 dargelegt wird. Die erhaltenen experimentellen Ergebnisse werden online durch den Algorithmus für das erweiterte Kalman-Filter während des Kranbetriebs berechnet. Die Experimente zeigen, dass der beste Ausgangswert der Kovarianzmatrix $P_{0ij} = 7 \cdot 10^2 \delta_{ij}$; $i, j = 1, 2, 3$ ist. Dieser ist aufgrund von Modellunsicherheiten und nicht berücksichtigte Störungen der Eingabe-/Ausgabesignale viel kleiner als in der Simulation. Figur 7 zeigt aber, dass sich die Schätzung des Trägheitsmoments der Last dem Bezugswert von 36.000kgm^2 nähert.

[0071] Der Ausgangswert für das Trägheitsmoment \hat{J}_{L0} wurde mit 47.000kgm^2 gewählt, und die verbleibenden Parameter und Ausgangsbedingungen waren gleich der Simulationskonfiguration. Da die Erregung der Torsionsbewegung bei 150 Sekunden angehalten wurde, besteht zwischen dem geschätzten J_L und dem Bezugswert eine Restabweichung. Unter Berücksichtigung des langsamen dynamischen Verhaltens des flexiblen Systems nähert sich das geschätzte Trägheitsmoment schnell den Werten in dem Toleranzbereich um den Bezugswert. Eine Abweichung von $\pm 5\%$ zwischen \hat{J}_l und dem Bezugswert des Trägheitsmoments hat keine große Wirkung auf die Leistung der Antitorsionsschwingungssteuerung. Figur 8 zeigt das geschätzte Trägheitsmoment der Last, wenn der Ausgangswert \hat{J}_{L0} gleich dem Bezugswert ist. In diesem Fall ist die Masse des Containers gleichmäßig verteilt (siehe Gleichung (24)).

[0072] Das erhaltene Bestimmungsergebnis des Parameters J_L zeigt die Robustheit des Algorithmus des erweiterten Kalman-Filters, da außerhalb des Toleranzbereichs von $\pm 5\%$ keine Schätzungen berechnet werden. Die kleinen Abweichungen zwischen dem geschätzten Parameter und dem Bezugswert sind durch Modellunsicherheiten verursacht.

Schlussfolgerung

[0073] Die vorliegende Erfindung offenbart eine Ausweitung eines Steuer- und Automatisierungskonzepts für die Orientierung einer Kranlast. Da dieses Konzept ein adaptiver modellbasierender Algorithmus ist, müssen die Parameter des dynamischen Modells so präzise wie möglich bekannt sein. Die meisten Parameter können direkt gemessen werden, aber das Trägheitsmoment der Kranlast (Container) muss aufgrund der unbekanntenen Verteilung der Masse während des Kranbetriebs bestimmt werden. Das verwendete Bestimmungsverfahren, der erweiterte Kalman-Filter-Algorithmus, wird anhand des dynamischen Modells des an dem Seil hängenden Manipulators abgeleitet. Dieses Parameterbestimmungsverfahren wird in die Antitorsionsschwingungssteuerung integriert und wurde an einem LIEBHERR LHM 402 Hafenmobilkran getestet. Die erhaltenen Messergebnisse zeigen die schnelle Annäherung und die Robustheit der Schätzung des unbekanntenen Trägheitsmoments der Kranlast.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Steuern der Orientierung einer Kranlast, wobei ein Manipulator zum Handhaben der Last durch eine Rotatoreinrichtung mit einem an Seilen hängenden Haken verbunden ist und der Drehwinkel φ_L der Last durch eine Steuereinrichtung mit Hilfe des Trägheitsmoments J_L der Last als wichtigster Parameter gesteuert wird, wobei die Steuereinrichtung eine adaptive Steuereinrichtung ist, wobei das Trägheitsmoment J_L der Last während des Kranbetriebs basierend auf durch Messen des Systemzustands mindestens einer der folgenden Größen: Drehwinkel φ_H

des Hakens, Drehwinkel φ_L der Last, Änderung $\dot{\varphi}_H$ des Drehwinkels φ_H des Hakens und/oder Änderung $\dot{\varphi}_I$ des Drehwinkels φ_L der Last bestimmt wird,

dadurch gekennzeichnet, dass

ein Gyroskop zum Erhalten von Daten verwendet wird, durch die der Drehwinkel φ_H des Hakens und/oder der Drehwinkel φ_L der Last ermittelt werden können, wobei das Trägheitsmoment J_L mit Hilfe eines Beobachters bestimmt wird.

2. Verfahren zum Steuern der Orientierung einer Kranlast nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Drehwinkel φ_L der Last mit Hilfe einer adaptiven Bahnnachverfolgungssteuerung gesteuert wird.
3. Verfahren zum Steuern der Orientierung einer Kranlast nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein dynamisches Modell des Systems zum Berechnen von den Systemzustand beschreibenden Daten verwendet wird.
4. Verfahren zum Steuern der Orientierung einer Kranlast nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Torsionsschwingungen durch eine Antitorsionsschwingungseinrichtung mit Hilfe der durch das dynamische Modell errechneten Daten vermieden werden.
5. Verfahren zum Steuern der Orientierung einer Kranlast nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Differenz φ_C zwischen dem Drehwinkel φ_L der Last und dem Drehwinkel φ_H des Hakens durch die Rotatoreinrichtung verändert werden kann.
6. Verfahren zum Steuern der Orientierung einer Kranlast nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Differenz φ_C zwischen dem Drehwinkel φ_L der Last und dem Drehwinkel φ_H des Hakens durch einen mit der Rotatoreinrichtung verbundenen Messwertgeber gemessen wird.
7. Verfahren zum Steuern der Orientierung einer Kranlast nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Bewegungen eines von dem Seil geführten kardanischen Elements gemessen werden, um Daten zu erhalten, durch welche der Drehwinkel φ_H des Hakens und/oder der Drehwinkel φ_L der Last ermittelt werden können.
8. Verfahren zum Steuern der Orientierung einer Kranlast nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Änderung $\dot{\varphi}_H$ des Drehwinkels φ_H des Hakens und/oder die Änderung $\dot{\varphi}_I$ des Drehwinkels φ_L der Last durch ein Gyroskop gemessen werden
9. Verfahren zum Steuern der Orientierung einer Kranlast nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** das dynamische Modell des Systems auf den Bewegungsgleichungen eines physikalischen Modells mindestens der Seile, des Hakens und der Last beruht.
10. Verfahren zum Steuern der Orientierung einer Kranlast nach Anspruch 1 oder 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Trägheitsmoment J_H des Hakens und J_{Sp} des Manipulators als Parameter verwendet werden.
11. Verfahren zum Steuern der Orientierung einer Kranlast nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** während des Kranbetriebs ein Drehmoment an der Last und/oder dem Haken angelegt wird.
12. Verfahren zum Steuern der Orientierung einer Kranlast nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** die durch Messen des Systemzustands erhaltenen Daten mindestens die Änderung $\dot{\varphi}_H$ des Drehwinkels φ_H des Hakens und/oder die Änderung $\dot{\varphi}_I$ des Drehwinkels φ_L der Last als Reaktion auf das an der Last und/oder dem Haken angelegten Drehmoments umfassen.
13. Verfahren zum Steuern der Orientierung einer Kranlast nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein nur auf der Grundlage der Masse und der Maße der Last geschätzter Wert des Trägheitsmoments J_{L0} als Ausgangswert für J_L verwendet wird und korrigierte Werte J_{Lk} in einem iterativen Prozess ermittelt werden, um das Trägheitsmoment J_L zu bestimmen.
14. Verfahren zum Steuern der Orientierung einer Kranlast nach Anspruch 3,

EP 1 880 971 B1

dadurch gekennzeichnet, dass während des Kranbetriebs den Systemzustand beschreibende Daten von dem dynamischen Modell basierend auf einem Wert $J_{L,k-1}$ des Trägheitsmoments J_L errechnet und ein korrigierter Wert $J_{L,k}$ des Trägheitsmoments J_L anhand der errechneten Daten und der durch Messen des Systemzustands erhaltenen Daten ermittelt wird, um das Trägheitsmoment J_L zu bestimmen.

- 5
15. Verfahren zum Steuern der Orientierung einer Kranlast nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, dass das Trägheitsmoment J_L mit Hilfe eines nichtlinearen Beobachters bestimmt wird.
- 10
16. Verfahren zum Steuern der Orientierung einer Kranlast nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, dass das Trägheitsmoment J_L mit Hilfe eines erweiterten Kalman-Filters bestimmt wird.
- 15
17. Verfahren zum Steuern der Orientierung einer Kranlast nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, dass eine homogene Verteilung der Masse in der Last für eine Schätzung eines Ausgangswerts J_{L0} des Trägheitsmoments J_L der Last angenommen wird.
18. Verfahren zum Steuern der Orientierung einer Kranlast nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, dass Rauschen in den durch Messungen erhaltenen Daten bei der Bestimmung des Trägheitsmoments J_L berücksichtigt wird.
- 20
19. Verfahren zum Steuern der Orientierung einer Kranlast nach Anspruch 18,
dadurch gekennzeichnet, dass das Rauschen in den durch Messungen erhaltenen Daten durch Kovarianzmatrizen modelliert wird.
- 25
20. Verfahren zum Steuern der Orientierung einer Kranlast nach Anspruch 19,
dadurch gekennzeichnet, dass die Kovarianzmatrizen experimentell ermittelt werden.
- 30
21. System zum Steuern der Orientierung einer Kranlast nach dem Verfahren eines der vorstehenden Ansprüche, umfassend eine Steuereinrichtung zum Steuern des Drehwinkels φ_L der Last und ein Gyroskop zum Erhalten von Daten, durch die der Drehwinkel des Hakens φ_H und/oder der Drehwinkel φ_L der Last ermittelt wird, wobei die Steuereinrichtung eine Bahnplanungseinrichtung und eine Bahnsteuerungseinrichtung sowie einen Beobachter zum Schätzen des Trägheitsmoments J_L enthält.
- 35
22. Kran, insbesondere ein Auslegerkran, der das System zum Steuern der Drehung einer Kranlast nach Anspruch 21 umfasst.

Claims

- 40
1. A method for controlling the orientation of a crane load, wherein a manipulator for manipulating the load is connected by a rotator unit to a hook suspended on ropes and the rotational angle φ_L of the load is controlled by a control unit using the moment of inertia J_L of the load as most important parameter, wherein the control unit is an adaptive control unit, wherein the moment of inertia J_L of the load is identified during operation of the crane based on at least one of the following variables obtained by measuring the state of the system: rotational angle φ_H of the hook, rotational angle φ_L of the load, change $\dot{\varphi}_H$ in the rotational angle φ_H of the hook and/or change $\dot{\varphi}_L$ in the rotational angle φ_L of the load,
45 **characterized in that,**
a gyroscope is used to obtain data by which the rotational angle φ_H of the hook and/or the rotational angle φ_L of the load can be determined, wherein the moment of inertia J_L is identified using an observer.
- 50
2. The method for controlling the orientation of a crane load according to claim 1, wherein the rotational angle φ_L of the load is controlled using an adaptive trajectory tracking control.
3. The method for controlling the orientation of a crane load according to claim 1, wherein a dynamic model of the system is used to calculate data describing the state of the system.
- 55
4. The method for controlling the orientation of a crane load according to claim 3, wherein torsional oscillations are avoided by an anti-torsional oscillation unit using the data calculated by the dynamical model.

5. The method for controlling the orientation of a crane load according to claim 1, wherein the difference φ_C between the rotational angle φ_L of the load and the rotational angle φ_H of the hook can be varied by the rotator unit.
- 5 6. The method for controlling the orientation of a crane load according to claim 1, wherein the difference φ_C between the rotational angle φ_L of the load and the rotational angle φ_H of the hook is measured by an encoder connected to the rotator unit.
7. The method for controlling the orientation of a crane load according to claim 1, wherein the movements of a cardanic element guided by the rope are measured to obtain data by which the rotational angle φ_H of the hook and/or the rotational angle φ_L of the load can be determined.
- 10 8. The method for controlling the orientation of a crane load according to claim 1, wherein the change $\dot{\varphi}_H$ in the rotational angle φ_H of the hook and/or the change $\dot{\varphi}_L$ in the rotational angle φ_L of the load are measured by a gyroscope.
- 15 9. The method for controlling the orientation of a crane load according to claim 3, wherein the dynamical model of the system is based on the equations of motion of a physical model of at least the ropes, the hook and the load.
10. The method for controlling the orientation of a crane load according to claim 1 or 3, wherein the moment of inertia J_H of the hook and J_{Sp} of the manipulator are used as parameters.
- 20 11. The method for controlling the orientation of a crane load according to claim 1, wherein during the operation of the crane a torque is applied to the load and/or the hook.
12. The method for controlling the orientation of a crane load according to claim 11, wherein the data obtained by measuring the state of the system at least comprise the change $\dot{\varphi}_H$ in the rotational angle φ_H of the hook and/or the change $\dot{\varphi}_L$ in the rotational angle φ_L of the load in reaction to the torque applied to the load and/or the hook.
- 25 13. The method for controlling the orientation of a crane load according to claim 1, wherein a value of the moment of inertia J_{L0} estimated only on the basis of the mass and the dimensions of the load is used as an initial value for J_L and corrected values J_{Lk} are determined in an iterative process in order to identify the moment of inertia J_L .
- 30 14. The method for controlling the orientation of a crane load according to claim 3, wherein during operation of the crane data describing the state of the system are calculated by the dynamical model based on a value $J_{L,k-1}$ of the moment of inertia J_L and a corrected value J_{Lk} of the moment of inertia J_L is determined based on the calculated data and the data obtained by measuring the state of the system in order to identify the moment of inertia J_L .
- 35 15. The method for controlling the orientation of a crane load according to claim 1, wherein the moment of inertia J_L is identified using a non-linear observer.
- 40 16. The method for controlling the orientation of a crane load according to claim 1, wherein the moment of inertia J_L is identified using an extended Kalman filter.
17. The method for controlling the orientation of a crane load according to claim 1, wherein a homogeneous distribution of mass inside the load is assumed for an estimation of an initial value J_{L0} of the moment of inertia J_L of the load.
- 45 18. The method for controlling the orientation of a crane load according to claim 1, wherein noise in the data obtained by measurements is taken into account in the identification of the moment of inertia J_L .
19. The method for controlling the orientation of a crane load according to claim 18, wherein the noise in the data obtained by measurements is modelled by covariance matrices.
- 50 20. The method for controlling the orientation of a crane load according to claim 19, wherein the covariance matrices are determined experimentally.
- 55 21. System for controlling the orientation of a crane load according to the method of any one of the preceding claims, comprising a control unit for controlling the rotational angle φ_L of the load and a gyroscope for receiving data by which the rotational angle φ_H of the hook and/or the rotational angle φ_L of the load are determined, wherein the control unit includes a trajectory planning unit and a trajectory control unit as well as an observer for estimating the

moment of inertia J_L .

22. A crane, especially a boom crane, comprising the system for controlling the rotation of a crane load according to claim 21.

5

Revendications

- 10 1. Procédé de commande de l'orientation d'une charge de grue, dans lequel un manipulateur destiné à manipuler la charge est relié à un crochet suspendu à des câbles par un dispositif rotateur et l'angle de rotation φ_L de la charge est commandé comme paramètre le plus important par un dispositif de commande à l'aide du moment d'inertie J_L de la charge, le dispositif de commande étant un dispositif de commande adaptatif, le moment d'inertie J_L de la charge étant déterminé pendant le fonctionnement de la grue sur la base d'au moins une des grandeurs suivantes
- 15 obtenues par la mesure de l'état du système : angle de rotation φ_H du crochet, angle de rotation φ_L de la charge, modification $\dot{\varphi}_H$ de l'angle de rotation φ_H du crochet et/ou modification $\dot{\varphi}_l$ de l'angle de rotation φ_L de la charge, **caractérisé en ce que** un gyroscope est utilisé pour obtenir des données, permettant de déterminer l'angle de rotation φ_H du crochet et/ou l'angle de rotation φ_L de la charge, le moment d'inertie J_L étant déterminé à l'aide d'un observateur.
- 20 2. Procédé de commande de l'orientation d'une charge de grue selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** l'angle de rotation φ_L de la charge est commandé à l'aide d'une commande de suivi de trajectoire adaptative.
3. Procédé de commande de l'orientation d'une charge de grue selon la revendication 1, **caractérisé en ce qu'un** modèle dynamique du système est utilisé pour calculer des données décrivant l'état du système.
- 25 4. Procédé de commande de l'orientation d'une charge de grue selon la revendication 3, **caractérisé en ce que** les oscillations de torsion sont évitées par un dispositif anti-oscillations de torsion à l'aide des données calculées par le modèle dynamique.
- 30 5. Procédé de commande de l'orientation d'une charge de grue selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** la différence φ_C entre l'angle de rotation φ_L de la charge et l'angle de rotation φ_H du crochet peut être modifiée par le dispositif rotateur.
- 35 6. Procédé de commande de l'orientation d'une charge de grue selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** la différence φ_C entre l'angle de rotation φ_L de la charge et l'angle de rotation φ_H du crochet est mesurée par un capteur de mesure relié au dispositif rotateur.
- 40 7. Procédé de commande de l'orientation d'une charge de grue selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** les mouvements d'un élément à Cardan guidé par le câble sont mesurés afin d'obtenir des données permettant de déterminer l'angle de rotation φ_H du crochet et/ou l'angle de rotation φ_L de la charge.
- 45 8. Procédé de commande de l'orientation d'une charge de grue selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** la modification $\dot{\varphi}_H$ de l'angle de rotation φ_H du crochet et/ou la modification $\dot{\varphi}_l$ de l'angle de rotation φ_L de la charge sont mesurées par un gyroscope.
9. Procédé de commande de l'orientation d'une charge de grue selon la revendication 3, **caractérisé en ce que** le modèle dynamique du système repose sur les équations de mouvement d'un modèle physique au moins des câbles, du crochet et de la charge.
- 50 10. Procédé de commande de l'orientation d'une charge de grue selon la revendication 1 ou 3, **caractérisé en ce que** les moments d'inertie J_H du crochet et J_{Sp} du manipulateur sont utilisés comme paramètres.
11. Procédé de commande de l'orientation d'une charge de grue selon la revendication 1, **caractérisé en ce qu'un** couple de rotation est appliqué sur la charge et/ou le crochet pendant le fonctionnement de la grue.
- 55 12. Procédé de commande de l'orientation d'une charge de grue selon la revendication 11, **caractérisé en ce que** les données obtenues par la mesure de l'état du système comprennent au moins la modification $\dot{\varphi}_H$ de l'angle de rotation φ_H du crochet et/ou la modification $\dot{\varphi}_l$ de l'angle de rotation φ_L de la charge comme réaction au couple de rotation

appliqué sur la charge et/ou le crochet.

- 5
13. Procédé de commande de l'orientation d'une charge de grue selon la revendication 1, **caractérisé en ce qu'**une valeur du moment d'inertie J_{L0} estimée uniquement sur la base de la masse et des dimensions de la charge est utilisée comme valeur initiale pour J_L et des valeurs corrigées J_{Lk} sont déterminées dans un processus itératif pour déterminer le moment d'inertie J_L .
- 10
14. Procédé de commande de l'orientation d'une charge de grue selon la revendication 3, **caractérisé en ce que**, pendant le fonctionnement de la grue, des données décrivant l'état du système sont calculées par le modèle dynamique sur la base d'une valeur $J_{L,k-1}$ du moment d'inertie J_L et une valeur corrigée J_{Lk} du moment d'inertie J_L est déterminée au moyen des données calculées et des données obtenues par la mesure de l'état du système pour déterminer le moment d'inertie J_L .
- 15
15. Procédé de commande de l'orientation d'une charge de grue selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** le moment d'inertie J_L est déterminé à l'aide d'un observateur non linéaire.
16. Procédé de commande de l'orientation d'une charge de grue selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** le moment d'inertie J_L est déterminé à l'aide d'un filtre de Kalman étendu.
- 20
17. Procédé de commande de l'orientation d'une charge de grue selon la revendication 1, **caractérisé en ce qu'**une répartition homogène de la masse dans la charge est supposée pour une estimation d'une valeur initiale J_{L0} du moment d'inertie J_L de la charge.
- 25
18. Procédé de commande de l'orientation d'une charge de grue selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** du bruit dans les données obtenues par des mesures est pris en compte pour la détermination du moment d'inertie J_L .
19. Procédé de commande de l'orientation d'une charge de grue selon la revendication 18, **caractérisé en ce que** le bruit dans les données obtenues par des mesures est modélisé par des matrices de covariance.
- 30
20. Procédé de commande de l'orientation d'une charge de grue selon la revendication 19, **caractérisé en ce que** les matrices de covariance sont déterminées de manière expérimentale.
- 35
21. Système de commande de l'orientation d'une charge de grue selon le procédé de l'une des revendications précédentes, comprenant un dispositif de commande destiné à commander l'angle de rotation φ_L de la charge et un gyroscope destiné à obtenir des données, permettant de déterminer l'angle de rotation du crochet φ_H et/ou l'angle de rotation φ_L de la charge, le dispositif de commande comportant un dispositif de suivi de trajectoire et un dispositif de commande de trajectoire ainsi qu'un observateur destiné à estimer le moment d'inertie J_L .
- 40
22. Grue, en particulier grue à flèche, qui comprend le système de commande de la rotation d'une charge de grue selon la revendication 21.

45

50

55

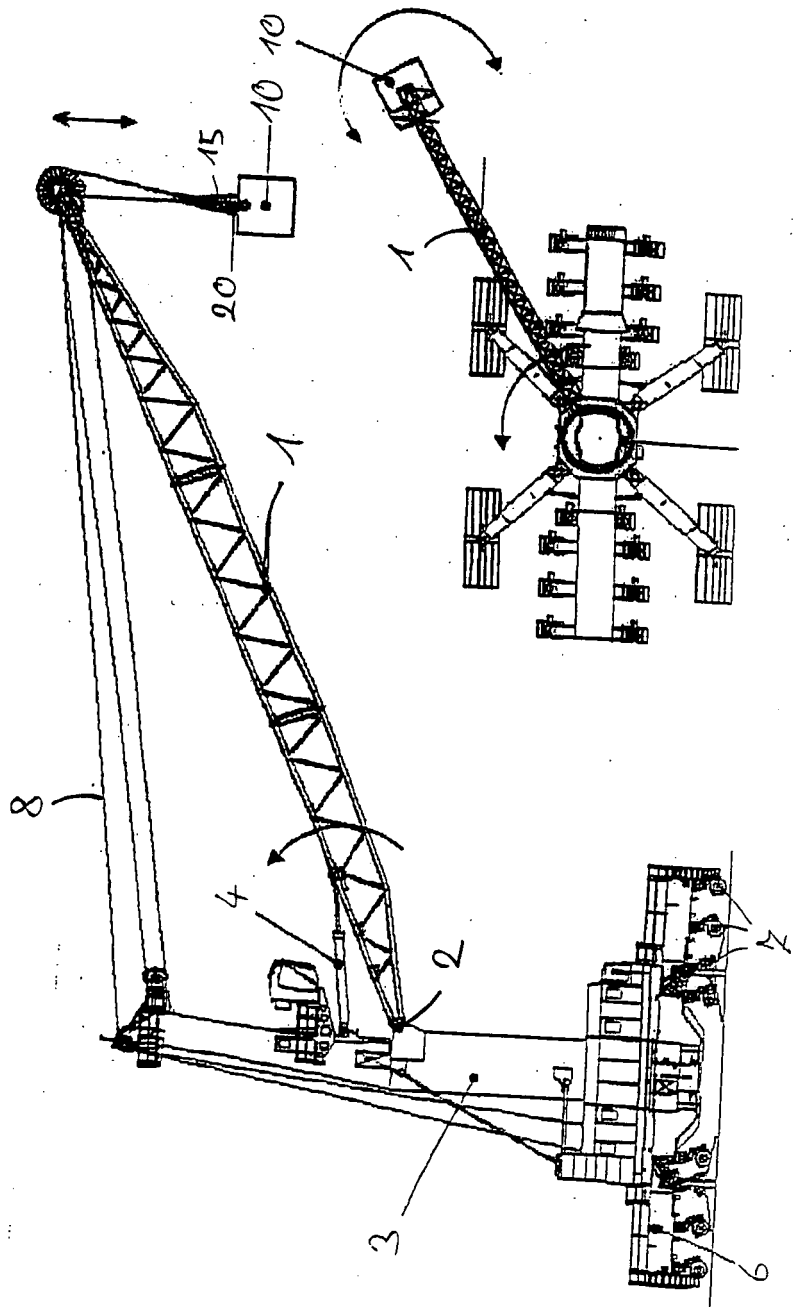
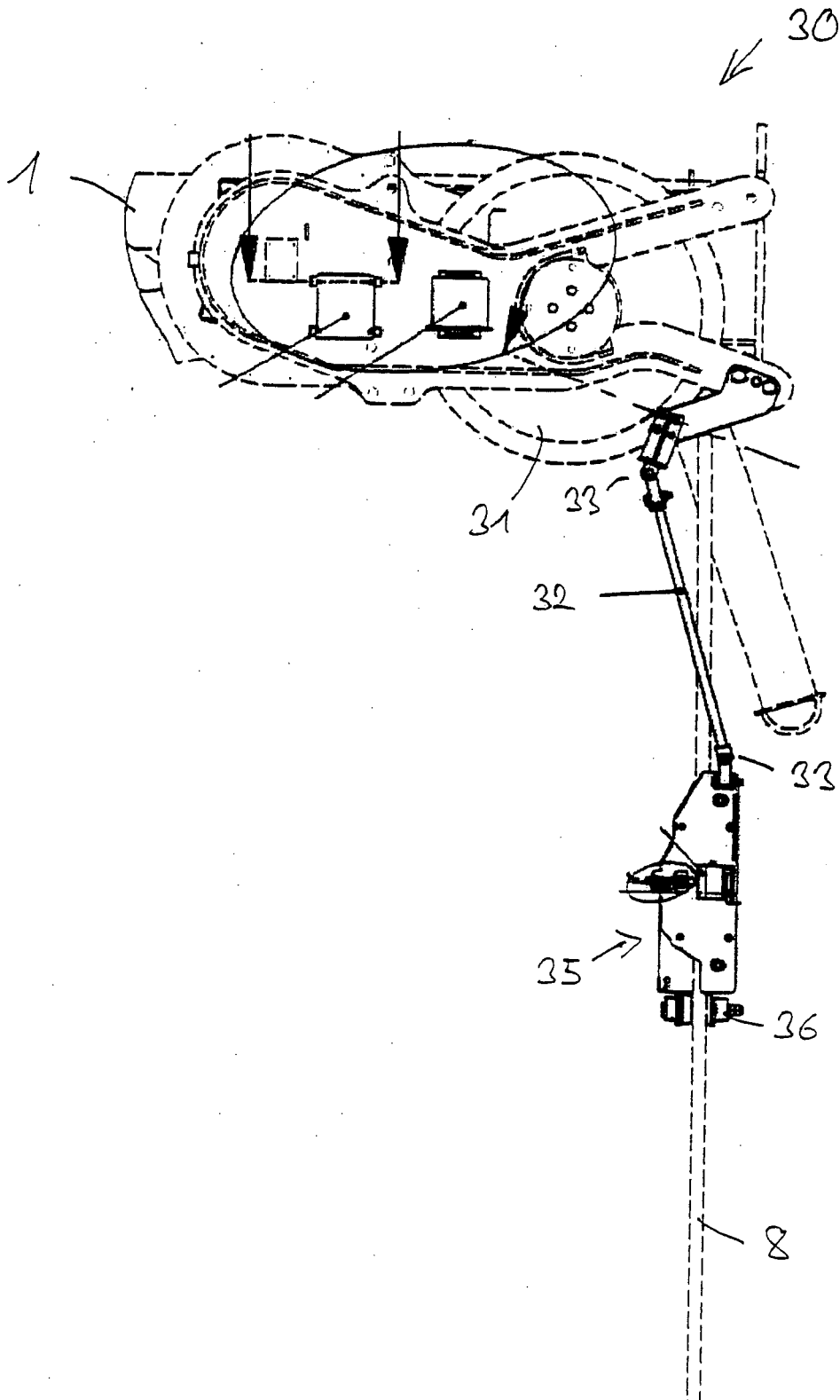
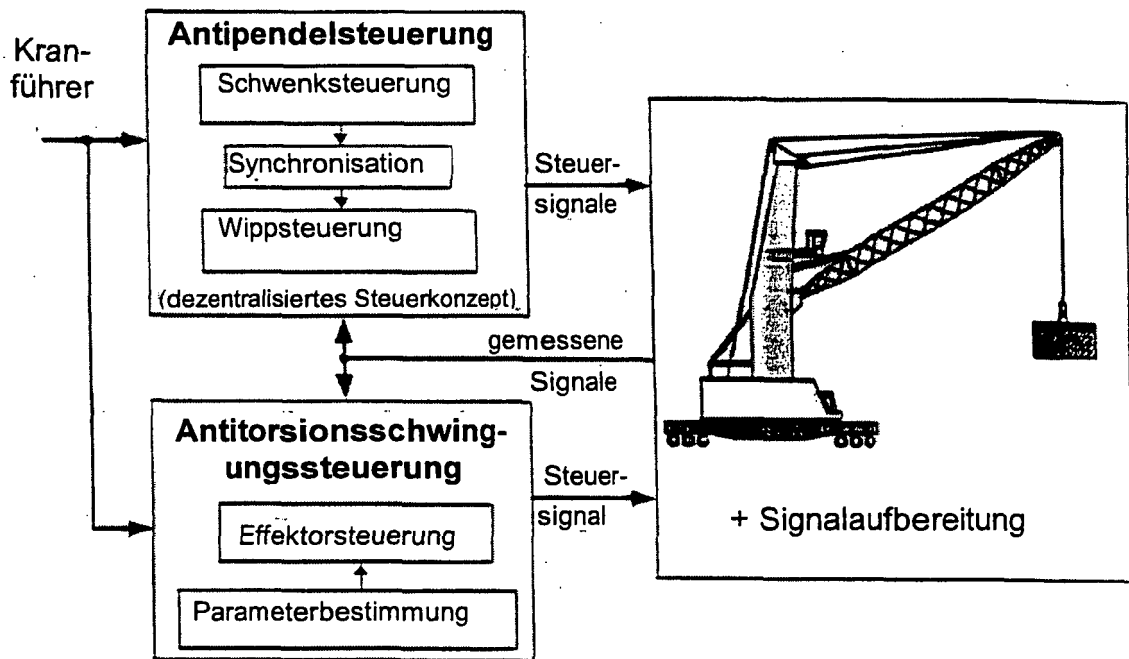


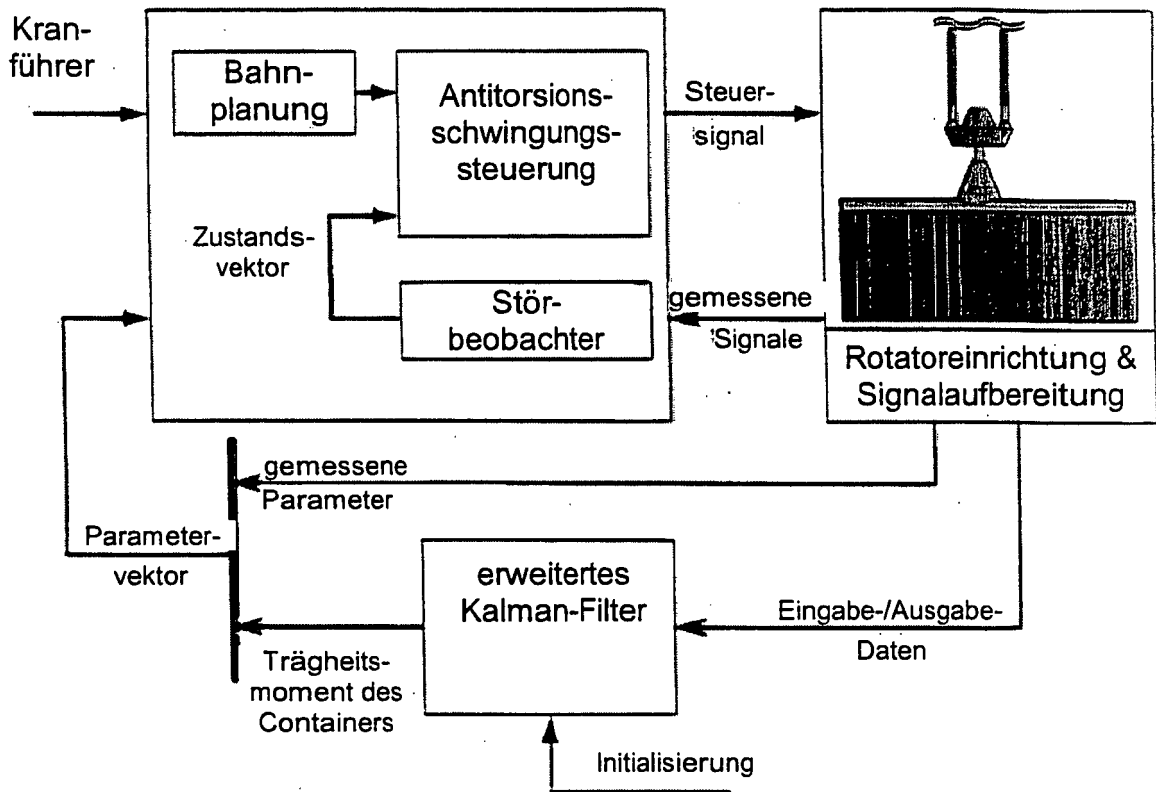
Fig.1a

Fig. 1b

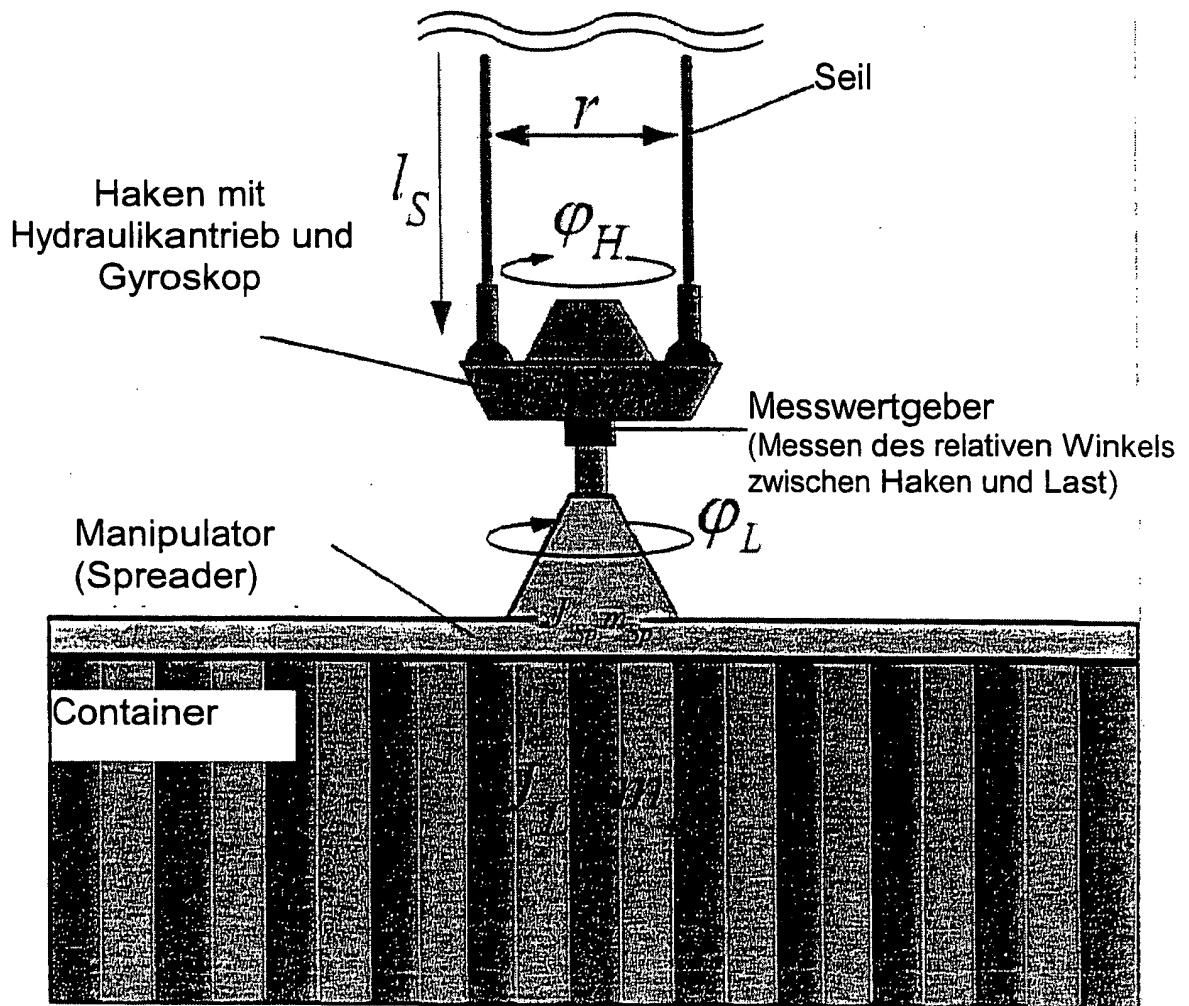




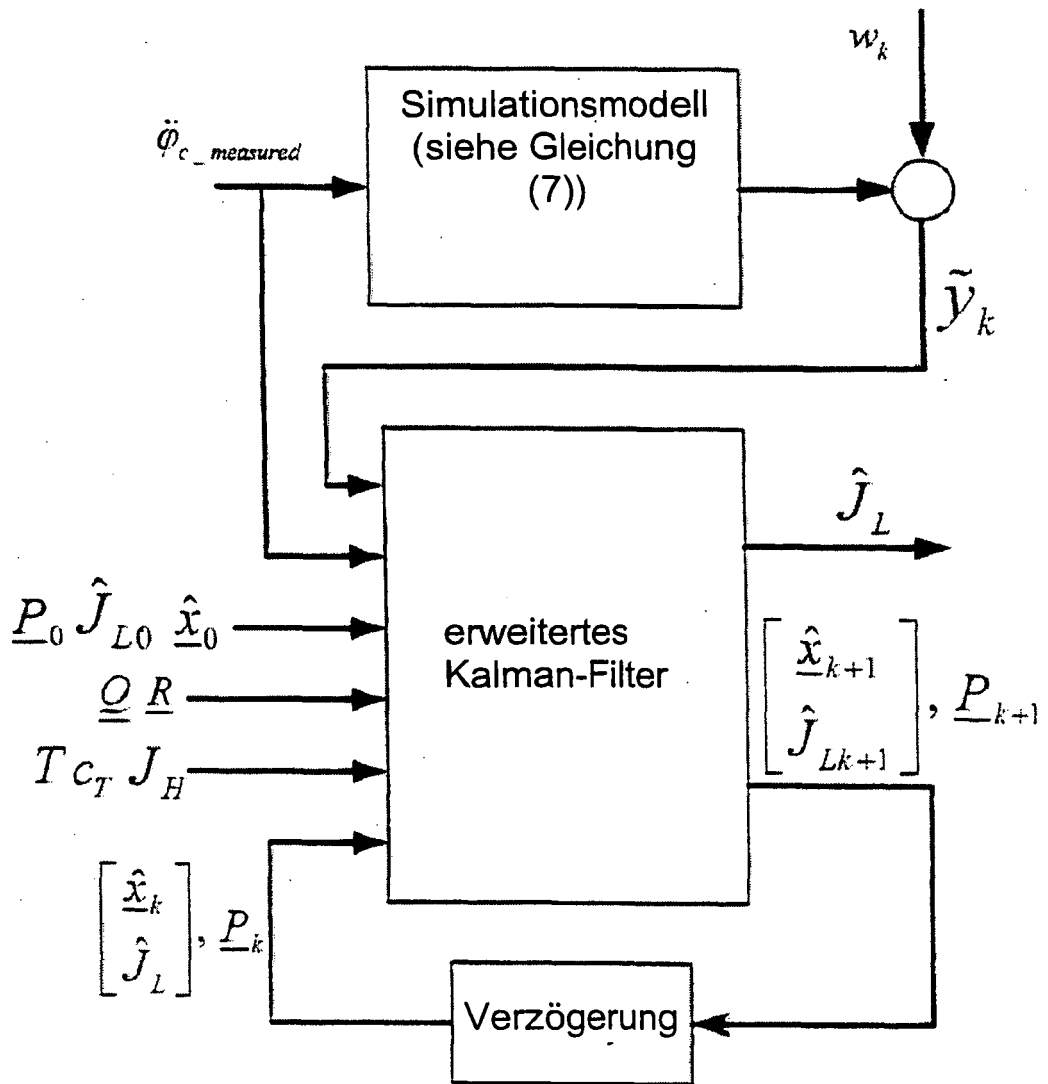
Figur 2: Steueraufbau des Hafenmobilkrans



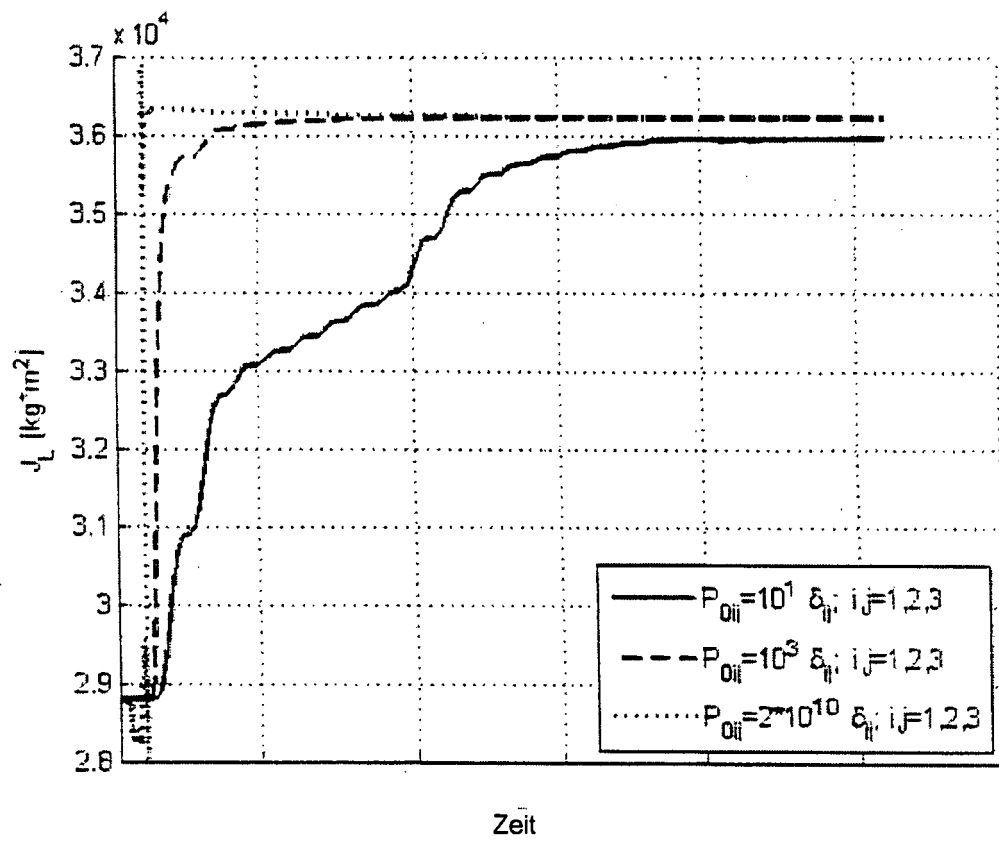
Figur 3: Aufbau der Antitorsionschwingungssteuerung



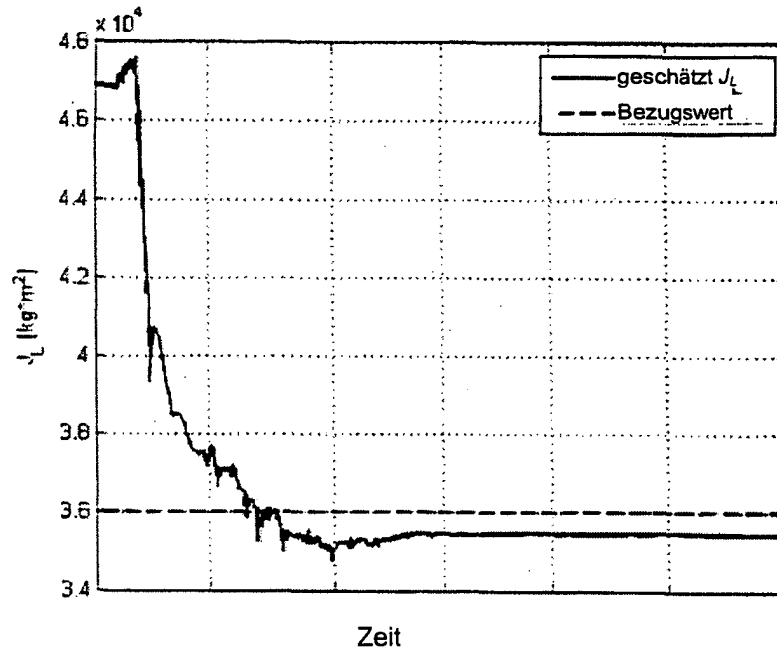
Figur 4: Am Seil hängende Rotatoreinrichtung mit Spreader und Nutzlast



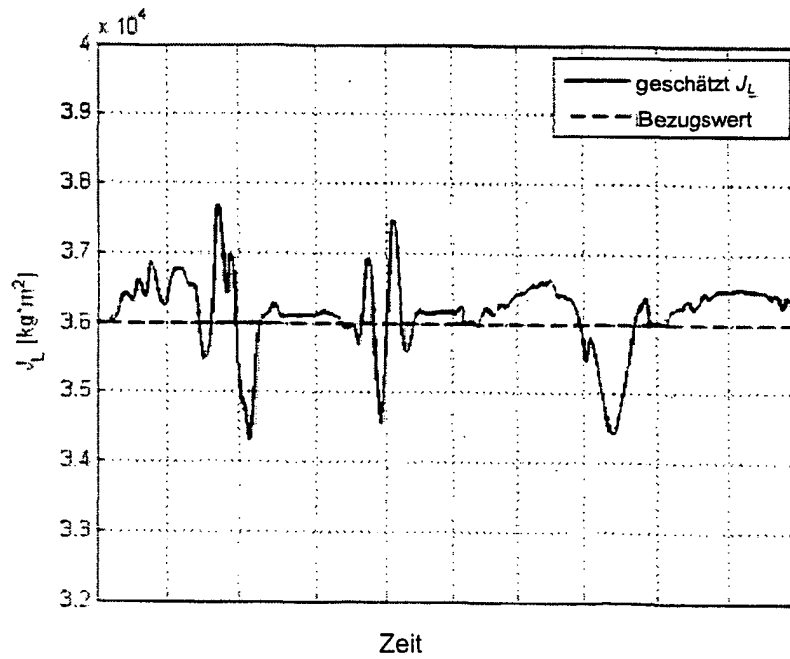
Figur 5: Aufbau des Simulationsumfelds



Figur 6: Bestimmungsleistung abhängig von der Matrix P_0



Figur 7: Bestimmung von J_L mit falschem Ausgangswert $J_{L,0}$



Figur 8: Bestimmung von J_L mit richtigem Ausgangswert $J_{L,0}$

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- DE 10064182 [0002] [0037] [0038]
- DE 10324692 [0002] [0037] [0038]
- DE 10029579 [0003] [0037] [0038] [0044]
- DE 19907989 A1 [0007]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **O. SAWODNY ; H. ASCHEMANN ; J. KÜMPEL ; C. TARIN ; K. SCHNEIDER.** Anti-Sway Control for Boom Cares. American Control Conference, 2002, 244-249 [0038]
- **O. SAWODNY ; A. HILDEBRANDT ; K. SCHNEIDER.** Control Design for the Rotation of Crane Loads for Boom Cranes. International Conference on Robotics & Automation, 2003, 2182-2187 [0038] [0044]
- **J. NEUPERT ; A. HILDEBRANDT ; O. SAWODNY ; K. SCHNEIDER.** A Trajectory Planning Strategy for Large Serving Robots. SICE Annual Conference, 2005, 2180-2185 [0038]
- **L. SCIavicco ; B. Siciliano.** Modelling and Control of Robot Manipulators. Springer-Verlag, 2001 [0048]
- **C.K. CHUI ; G. CHEN.** Kalman Filtering with Real-Time Application. Springer-Verlag, 1999 [0057]
- **T. IWASAKI ; T. KATAOKA.** Application Of An Extended Kalman Filter To Parameter Identification Of An Induction Motor. Industry Applications Society Annual Meeting, 1989, vol. 1, 248-253 [0063]